Treibhauseffekt und Klimawandel

Woher kommt die weltweite Temperaturerhöhung?

Unbestritten ist, dass der Erwärmungstrend über die letzten 50 Jahre in Höhe von 0,13 K pro Jahrzehnt fast zweimal so groß ist wie derjenige über die letzten 100 Jahre. 2015 erreichte die Temperaturerhöhung weltweit den Wert von 0,85 K.

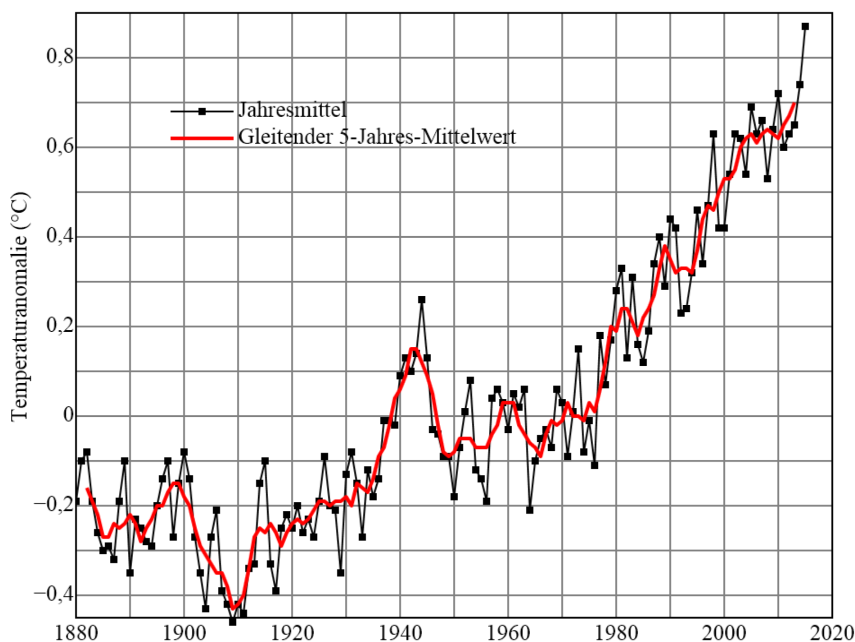


Abb. 1: Weltweiter Land-Ozean-Temperaturindex.

Von: NASA Goddard Institute for Space Studies, Lizenz: CC 0

Kritiker der These vom anthropogenen (menschengemachten) Klimawandel sagen, es habe in der Geschichte des Klimas der Erde schon immer sehr starke Temperaturschwankungen gegeben, lange bevor der Mensch überhaupt Einfluss auf das Klima nehmen konnte. Doch inzwischen weiß man über den Klimaverlauf der letzten 50.000 Jahre auf der Erde genau Bescheid.
Aufgrund der Untersuchung von Sedimenten, Baumwuchsringen und Eisbohrkernen kann man den Temperaturverlauf der ca. letzten 50.000 Jahre auf ein Jahr genau zurückverfolgen. Dabei zeigt sich zwar, dass es auch ohne Zutun des Menschen eine Vielzahl von starken Temperaturänderungen gab. Allerdings ereigneten sich diese Temperaturänderungen alle relativ sprunghaft innerhalb weniger Jahre.
Im Unterschied dazu erfolgte über die letzten 150 Jahre eine bislang nicht dagewesene kontinuierliche Erwärmung. Diese erfolgte parallel zur Industrialisierung und der Zunahme und Intensivierung der Landwirtschaft und der damit verbundenen vermehrten Produktion von CO_2, CH_4, N_2O und anderen menschengemachten Gasen, was man als Beweise für eine menschengemachte Klimaänderung sehen kann.

© Siemens Stiftung 2017. Inhalt lizenziert unter CC BY-SA 4.0 international

VISIT…

LANZAROTE Caliente.com

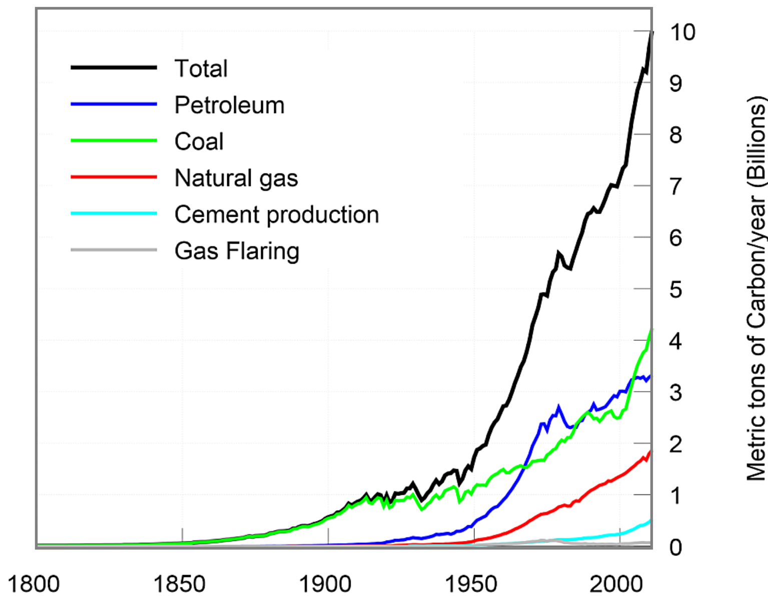


Abb. 2: Weltweite CO_2-Emissionen aufgrund fossiler Brennstoffe 1800–2007.

By Global_Carbon_Emission_by_Type_to_Y2004.png: Mak Thorpederivative work: Autopilot (talk) - http://cdiac.ornl.gov/ftp/ndp030/CSV-FILES/ and Global_Carbon_Emission_by_Type_to_Y2004.pngOriginal Data citation: "Marland, G., T.A. Boden, and R. J. Andres. 2007. Global, Regional, and National CO2 Emissions. In Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, United States Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A."., CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10868614

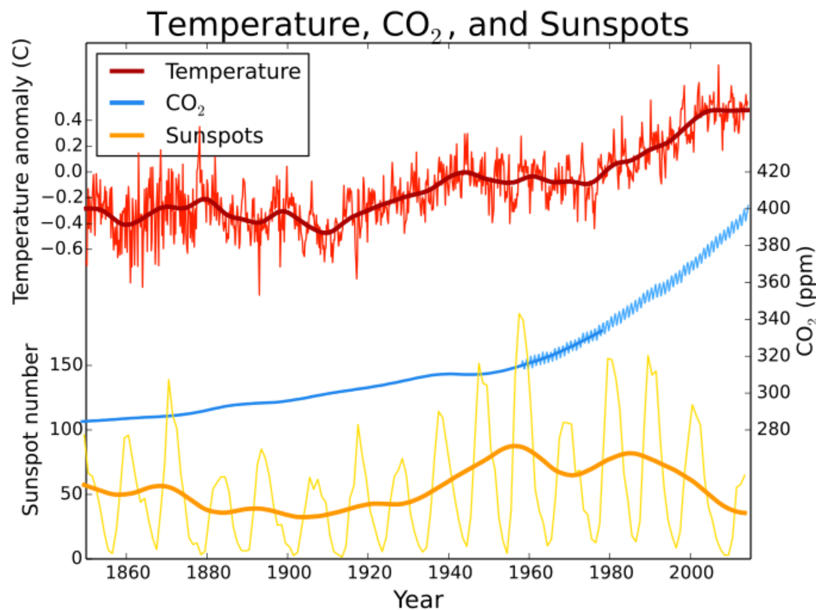


Abb. 3: Durchschnittstemperatur, CO_2 in der Atmosphäre und Sonnenaktivität seit 1850. Die dicken Linien für Temperatur und Sonnenaktivität zeigen eine Glättung der Rohdaten (Durchschnitt von jeweils 25 Jahren).

By Leland McInnes at the English language Wikipedia, CC BY-SA 3.0, Quelle: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6696694

Auch die Behauptung, dass der Klimawandel durch Schwankungen der Sonnenaktivität zustande kommt, lässt sich, wie die Grafik zeigt, nicht halten.

© Siemens Stiftung 2017. Inhalt lizenziert unter CC BY-SA 4.0 international

Wodurch wird, abweichend vom globalen Klima, das lokale Klima beeinflusst?

Aufgrund der lokalen Temperaturunterschiede auf der Erde kommt es ständig zu Luft- und Meeresströmungen zwischen wärmeren und kälteren Gebieten. So ist z. B. das Klima in Mitteleuropa durch den warmen Golfstrom derzeit wärmer, als es der geografischen Lage entspricht. Es könnte aber, wenn der Golfstrom durch die Erwärmung Europas zusammenbricht, in Europa sogar kälter werden. Der sog. Golfstrom ist thermohalin, d. h. er wird durch Unterschiede in der Temperatur und im Salzgehalt in Gang gehalten.

Früher war das Wetter in Deutschland vor allem durch West- und Ostluftströmungen bestimmt. Dass seit einigen Jahren das Wetter in Deutschland im Unterschied zu früher zunehmend durch Nord- und Südströmungen bestimmt ist, wird oft mit Änderungen der Meereswassertemperaturen im Polarmeer begründet.

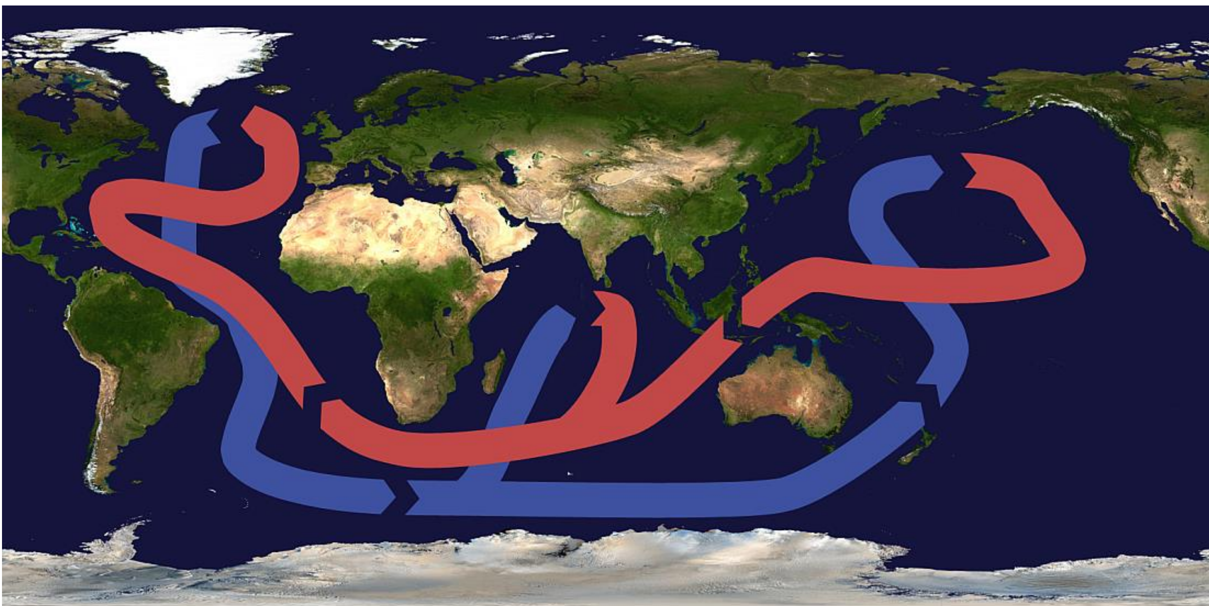


Abb. 4: Das „thermohaline globale Förderband“.

Von: CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=138193 (Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Meeresstr%C3%B6mung#/media/File:Thermohaline_circulation.), Lizenz: CC BY-SA 3.0

Wachsende Gletscher – Widerspricht das nicht dem Klimawandel?

In den Alpen, in Südamerika und im Himalaja schmelzen die Gletscher ab, aber in Neuseeland wachsen sie. Dies ist kein Widerspruch zur Klimaerwärmung. Denn aufgrund der erhöhten Meerestemperaturen um Neuseeland steigt die Wasserdampfbildung und damit die Wolkenbildung. Diese Wolken werden aufgrund der Luftströmungen weit transportiert. Deshalb schneit es auf den hohen Bergen (über 3.000 m) Neuseelands, das von erwärmtem Meer umgeben ist, mehr als früher und die Gletscher dort wachsen.
Dagegen schmelzen in Grönland die Gletscher und die Eisdecke der Arktis wird dünner und kleiner. Die Eisdecke am Rand der Antarktis schmilzt derzeit, aber im Inneren der Antarktis wächst sie durch verstärkten Schneefall.

© Siemens Stiftung 2017. Inhalt lizenziert unter CC BY-SA 4.0 international

Der Treibhauseffekt und seine Ursachen

Der Treibhauseffekt soll Ursache des weltweiten Klimawandels sein. Doch was genau ist nun dieser Treibhauseffekt? Fälschlicherweise wird der Treibhauseffekt als etwas prinzipiell Negatives dargestellt. Zunächst muss deshalb richtig gestellt werden, dass ohne Treibhauseffekt kein Leben auf der Erde möglich wäre. Denn ohne Treibhauseffekt, d. h. ohne Atmosphäre, würde die Durchschnittstemperatur der Erdoberfläche bei nur –18 °C liegen! Wir unterscheiden also den natürlichen Treibhauseffekt und den vom Menschen zusätzlich verursachten, anthropogen verstärkten Treibhauseffekt.

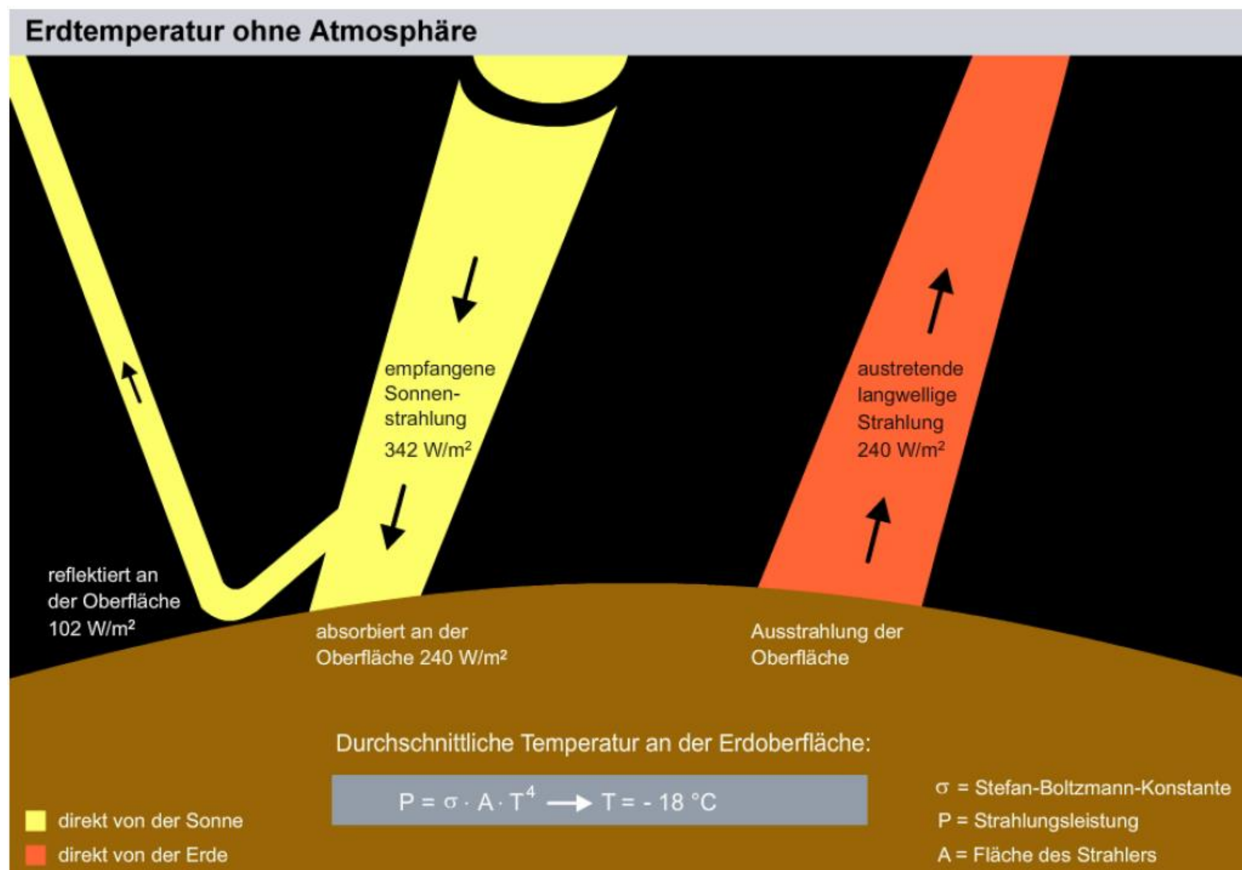


Abb. 5: Ohne Treibhauseffekt wäre die Erdoberfläche –18 °C kalt.

Wir stellen uns die Erde zunächst ohne Hülle aus Gasen, Wolken und Staub vor. Die Erde ist also eine vom Sonnenlicht angestrahlte nackte Kugel, die sich so lange aufheizen würde, bis eine bestimmte Temperatur erreicht ist. Dass diese Temperatur nicht immer weiter ansteigt ,beruht auf dem sog. „Strahlungsgleichgewicht“: Ab dem Erreichen einer bestimmten Temperatur strahlt die Erdkugel genauso viel Energie pro Zeiteinheit wieder ab, wie sie pro Zeiteinheit aufnimmt; Abstrahlungsleistung ist dann gleich Einstrahlungsleistung. Wir sehen in der Grafik, dass die Summe aus der an der Erdoberfläche direkt reflektierten Strahlung (102 W/m^2) und der von der erwärmten Erdoberfläche wieder abgestrahlten Leistung (240 W/m^2) genauso groß ist wie die eingestrahlte Sonnenleistung (342 W/m^2).

© Siemens Stiftung 2017. Inhalt lizenziert unter CC BY-SA 4.0 international

Die diesem Strahlungsgleichgewicht entsprechende Temperatur der Erdoberfläche lässt sich nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz berechnen:

$$S_E = \sigma \cdot T^4 \Rightarrow T = \sqrt[4]{\frac{S_E}{\sigma}}$$

Dabei ist S_E die Strahlungsdichte in W/m². Die Dichte der Sonnenstrahlung beträgt auf der Umlaufbahn der Erde um die Sonne 1.370 W/m². Da diese Raumstrahlung nicht auf die Kugeloberfläche ($4 \cdot \pi \cdot r^2$) der Erde einwirkt, sondern auf den Querschnitt ($\pi \cdot r^2$), errechnet sich die empfangene Strahlungsdichte, bezogen auf die Kugeloberfläche der Erde folgendermaßen:

$$1.370 \cdot (\pi \cdot r^2)/(4 \cdot \pi \cdot r^2) = 342 \text{ W/m}^2.$$

Nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz ergibt sich für eine Erde ohne Atmosphäre eine Oberflächentemperatur von –18 °C. Ohne einen weiteren wärmenden Effekt wäre die Erde mit einer Temperatur von –18 °C für den Menschen nicht bewohnbar.

Woher kommt es, dass die Erdoberfläche 15 °C warm ist?

Wie oben erwähnt, müssen nach dem Gesetz des Strahlungsgleichgewichts 100 % der von der Sonne eingestrahlten Energie auch wieder von der Erde abgestrahlt werden. Warum kommt es dennoch zu einer Erhöhung der Erdtemperatur?

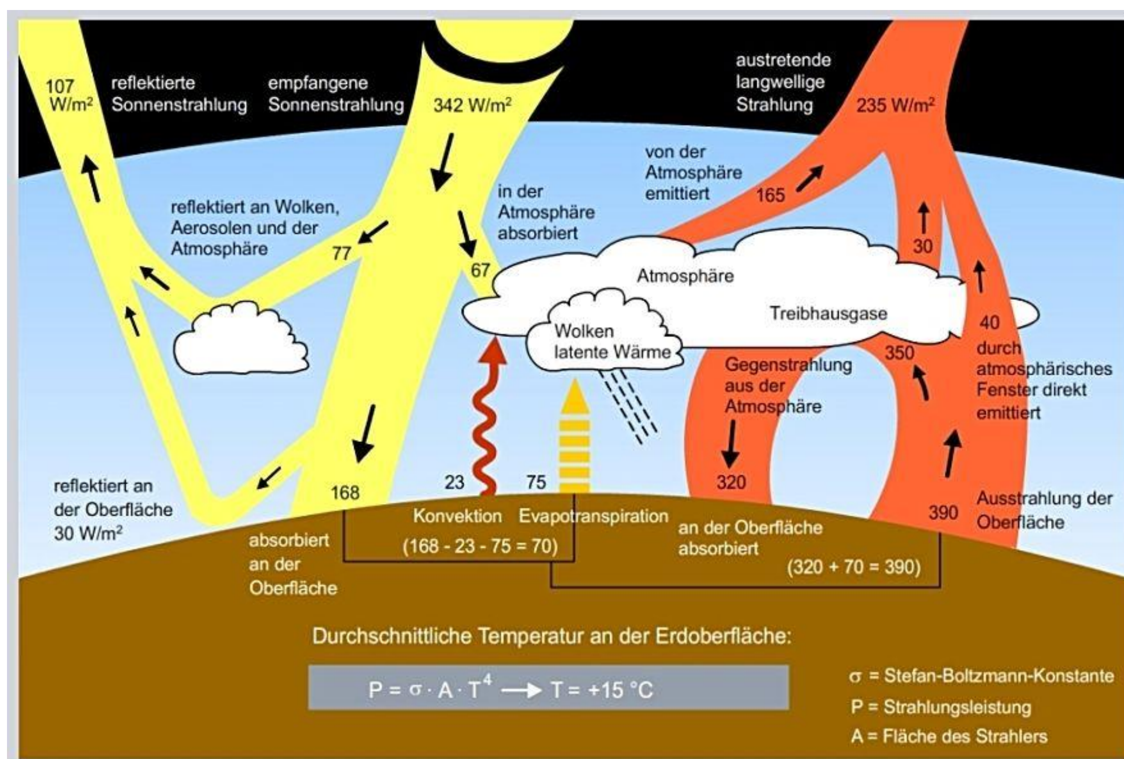


Abb. 6: Globale Strahlungsbilanz der Erde.

© Siemens Stiftung 2017. Inhalt lizenziert unter CC BY-SA 4.0 international

Etwas vereinfacht lässt sich das folgendermaßen erklären:

Sonneneinstrahlung

- Wegen der hohen Temperatur der Sonnenoberfläche von ca. 6.000 °C ist das auf die Erde fallende Sonnenlicht relativ kurzwellig (Schwerpunkt UV bis nahes IR).
- Trifft das Sonnenlicht auf die Erdatmosphäre, werden ca. 22 % direkt zurück in den Weltraum reflektiert. Der Hauptteil des Lichts (70 %) dringt durch die Atmosphäre hindurch, denn in ihr findet praktisch keine Absorption dieser kurzen Wellenlängen statt (CO_2, CH_4, N_2O und andere Gase absorbieren keine kurzen Wellenlängen). Nur bestimmte Aerosole, sowie Ruß- und Ascheteilchen absorbieren auch in diesem kurzwelligen Bereich (knapp 20 %).
- An der Erdoberfläche werden ca. 9 % reflektiert und gelangen von dort zurück in den Weltraum. Die restlichen 50 % werden durch Umwandlung der Strahlungsenergie des Lichts in Wärmeenergie (= Bewegung der kleinsten Teilchen der Materie) absorbiert.

Konvektion und Evapotranspiration

- Durch Konvektion (aufsteigende erwärmte Luftschichten) und verdampfendes Wasser (Evapotranspiration) werden ca. 58 % der in der Erdoberfläche gespeicherten Wärmeenergie zurück in die Atmosphäre transportiert.
- Diese erwärmten Luft und Wolkenschichten strahlen selbst wieder langwellig ab, einen relativ großen Teil davon in Richtung Erdoberfläche (Rückstrahlung).

Wiederabstrahlung der Erdoberfläche

- 42 % der gespeicherten Wärmeenergie strahlt die Erdoberfläche direkt wieder ab. Aber verglichen mit der Sonne ist die Temperatur der Erdoberfläche sehr niedrig, deshalb ist die Erdabstrahlung extrem langwellig (fernes IR).
- Ein guter Teil dieser langwelligen Abstrahlung wird von vielen Gasen der Atmosphäre absorbiert. Die Absorptionsbanden von H_2O, CO_2, CH_4, N_2O usw. liegen nämlich genau im Bereich der Wellenlänge der Erdoberflächen-Strahlung (CO_2 z. B. mit Absorptionsmaximum bei ca. 15 µm).

Rückstrahlung der Atmosphäre

- Die erwärmten* Gasmoleküle strahlen nun selbst wieder ab, einen guten Teil davon zurück in Richtung Erdoberfläche (= „Rückstrahlung“).
  * Die Wärme ist als Bewegungsenergie wie Vibration und Rotation gespeichert.

Erhöhung der Erdtemperatur durch Ausbildung oberflächennaher warmer Schichten

- Folge: Die Erdoberfläche bleibt durch Ausbildung von aufgewärmten Schichten über der Erdoberfläche warm. Und das obwohl (wegen Energieerhaltung und Strahlungsgleichgewicht) außer der für Photosynthese verbrauchten Energie über 99,99 % wieder ins Weltall abgestrahlt werden.

Reflexion erklärt nicht den Treibhauseffekt!

Oft liest man falsche Erklärungen, die den Treibhauseffekt aufgrund von Reflexion erklären. Doch wie wir gesehen haben, beruht der Treibhauseffekt im Wesentlichen auf der Absorption der von

© Siemens Stiftung 2017. Inhalt lizenziert unter CC BY-SA 4.0 international

der Erde abgestrahlten langwelligen Strahlung durch die Treibhausgasmoleküle. Die Wiederabstrahlung (ist nicht gleich Reflexion!) dieser Moleküle bewirkt zusammen mit den durch Konvektion und Evapotranspiration transportierten warmen Molekülen eine Rückstrahlung auf die Erde und die Ausbildung erdnaher aufgewärmter Schichten.
Die Atmosphäre reflektiert also nicht die von der Erdoberfläche abgegebene Strahlung, sondern sie absorbiert diese und strahlt sie zurück.
Reflexion (von lateinisch reflectere = zurückbiegen) bezeichnet in der Physik der elektromagnetischen Wellen das Zurückwerfen an einer Grenzfläche. Im Gegensatz dazu findet bei der Absorption eine Umwandlung der Energieform statt. Strahlt ein durch Absorption erwärmter Körper wieder Strahlungsenergie ab, spricht man von Wiederabstrahlung und nicht von Reflexion.

Der menschengemachte Treibhauseffekt

Erhöhung der Erdtemperatur durch Zunahme der Treibhausgase

Treibhausgase produzieren also in diesem Sinne keine Energie. Sie helfen vielmehr, ein Gleichgewicht auf einem Niveau zu erzeugen, bei dem die bodennahe Schicht der Atmosphäre – in der wir leben – „lebensfreundlich“ warm ist. Nimmt nun durch menschliche Aktivitäten die Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre zu, steigt die Absorption, damit die Rückstrahlung und somit auch die Temperatur in den erdnahen Schichten.

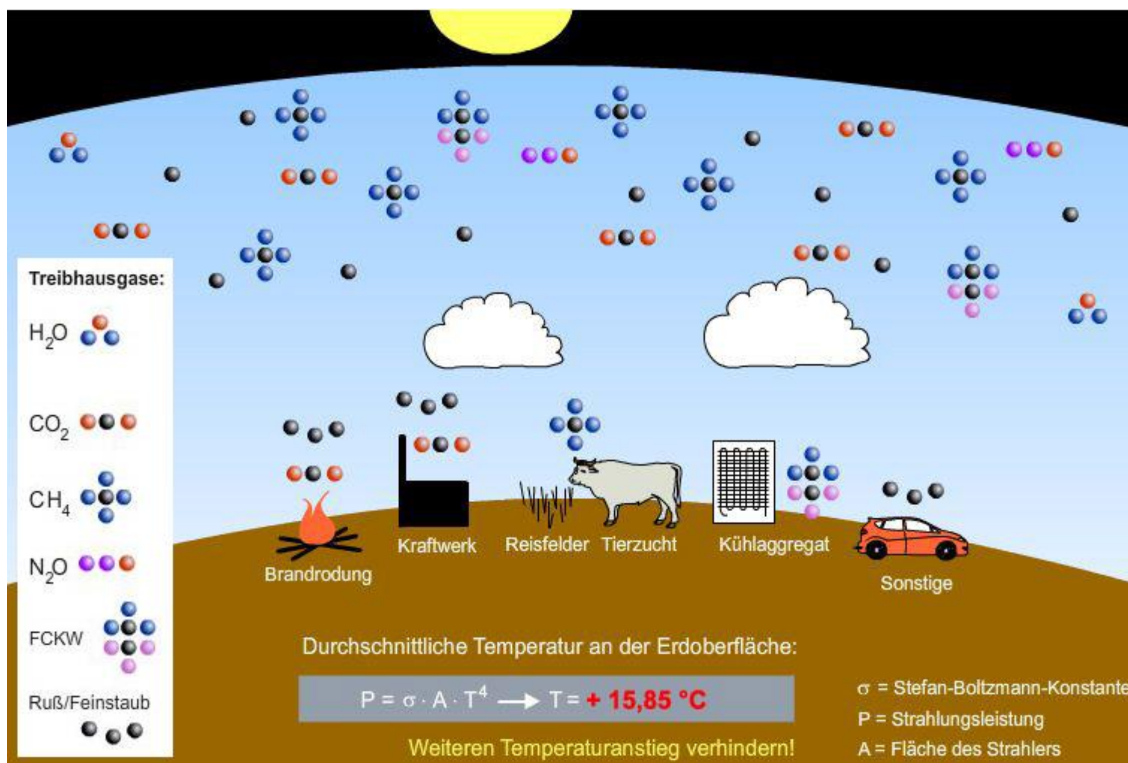


Abb. 7: Anstieg der Erdtemperatur durch menschengemachte Treibhausgase.

Die Physik der Treibhausgase

Die Stärke der Bindungskräfte zwischen den Atomen und deren Änderung während der Schwingung bestimmen in Molekülen den Wellenlängenbereich, in dem Energie absorbiert wird. Die langwellige thermische Strahlung können nur solche Moleküle absorbieren, die aus mehreren Atomsorten bestehen und beim Schwingen ihr Dipolmoment ändern. Zweiatomige unpolare Gase

© Siemens Stiftung 2017. Inhalt lizenziert unter CC BY-SA 4.0 international

wie O_2 und N_2 können nur symmetrische Schwingungen ohne Änderung des Dipolmoments ausführen. Das dreiatomige Kohlendioxid führt neben symmetrischen auch unsymmetrische Schwingungen aus. Diese werden durch Wärmestrahlung im Bereich von 4,3 µm bis 15,3 µm angeregt, ein Bereich, der sich gut mit dem Strahlungsspektrum der erwärmten Erdoberfläche deckt, das von ca. 3 µm bis 60 µm reicht. Vor diesem Hintergrund ist der CO_2- Konzentration in der Atmosphäre besondere Aufmerksamkeit zu schenken.

Welche Gase tragen zum Treibhauseffekt bei?

Die natürlich vorkommenden Gase wie Wasserdampf (H_2O), Kohlendioxid (CO_2) und Methan (CH_4) absorbieren die Wärmeabstrahlung der Erdoberfläche und verstärken die Gegenstrahlung, die zurück zur Erde geworfen wird. Das Emissions- und Absorptionsvermögen hängt vor allem bei Gasen sehr stark von der Wellenlänge ab. Das ist insbesondere bei den drei wichtigen Treibhausgasen Wasserdampf, CO_2 und Methan der Fall. Sauerstoff (O_2) und Stickstoff (N_2) sind die beiden Hauptgase, die ca. 99 % der Atmosphäre bilden. Sie besitzen im erdenergetisch wichtigen Bereich der langwelligen Wärmestrahlung kein Emissions- und Absorptionsvermögen.
Mengenmäßig trägt von Natur aus Wasserdampf den weitaus größten Teil (ca. zwei Drittel) zum Treibhauseffekt bei. Es folgen CO_2 mit einem Anteil von ca. 15 %, O_3 mit etwa 10 % und schließlich Distickstoffoxid (N_2O) und CH_4 mit je etwa 3 %. Zur genauen Berechnung der Anteile muss außerdem auch der Einfluss der Bewölkung und der Schwebeteilchen wie Staub und Aerosole auf die Sonnen- und Wärmestrahlung bekannt sein.
Die bei einem starken Vulkanausbruch freigesetzten Ascheteilchen und die SO_2-Konzentration in der Atmosphäre durch die Abschirmung der Erdoberfläche vom Sonnenlicht können beispielsweise eine mehrere Jahre andauernde Absenkung der Erdtemperatur bewirken. Das war erdgeschichtlich schon öfter der Fall.

Zu den Quellen, der Wirksamkeit und der Lebensdauer der menschengemachten Treibhausgase siehe auch die Sachinformation „Woher kommen die Treibhausgase?“. Zum Anstieg der Treibhausgasemissionen siehe auch das Infomodul „Entwicklung der Treibhausgasemissionen“. Beide Medien sind auf dem Medienportal der Siemens Stiftung vorhanden.

Treibhauseffekt im Trinkbecher als Modell für den der Erdatmosphäre

Verwendet wird ein transparenter Trinkbecher aus PET, der einmal offen und leer ins Sonnenlicht gestellt wird, und einmal abgedeckt und halbseitig mit schwarzem Karton ausgekleidet.
Im zweiten Fall steigt die Temperatur wesentlich stärker an.

© Siemens Stiftung 2017. Inhalt lizenziert unter CC BY-SA 4.0 international

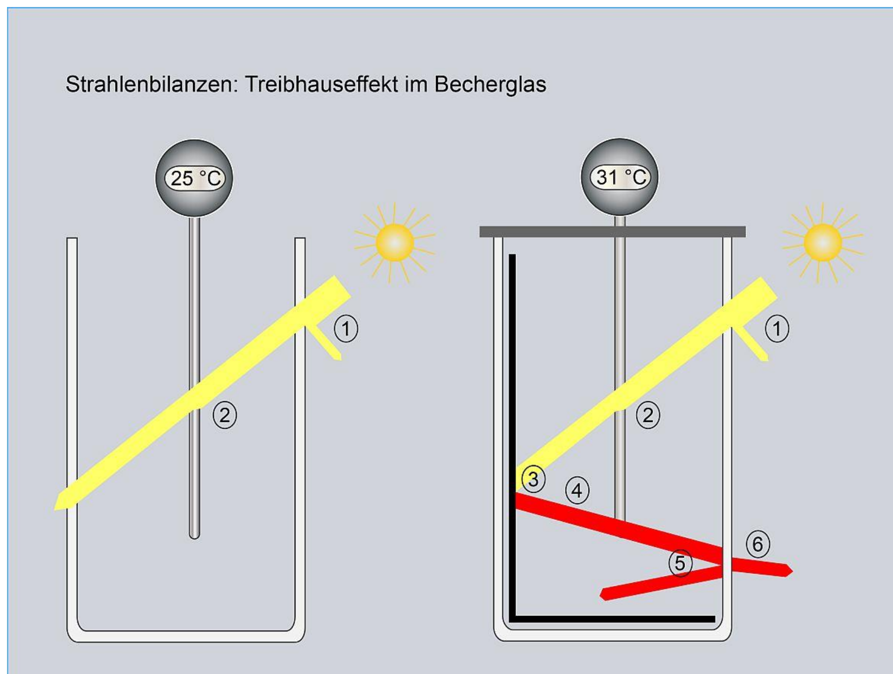


Abb. 8: Treibhauseffekt im Becherglas.

Legende zum Bild

1. Reflexion an der Becherwand
2. Absorption am Messfühler
3. Absorption an der schwarzen Pappe
4. Langwellige Abstrahlung an der schwarzen Pappe
5. Absorption und Wiederabstrahlung der Becherwand
6. Abstrahlung der Becherwand an die Umgebung

Im Experiment wird Energie in Form von Strahlung in das Klimagefäß eingetragen, die Energieabgabe des Becherinhalts durch Strahlung ist jedoch „gebremst“. Wieso ist das so? Am besten kann man das verstehen, wenn der Prozess in mehreren Stufen betrachtet wird.

Kurzwellige Einstrahlung: Sonnenlicht strahlt mit einer Temperatur (= Farbtemperatur, siehe Planck’sche Strahlungskurve) von bis zu 6.000 K, eine Halogenglühlampe mit bis zu 3.400 K. Beides entspricht, verglichen mit fernem Infrarot, hauptsächlich kurzwelliger Strahlung von ca. 250 nm bis ca. 1.000 nm (also UV-Licht, sichtbares Licht und nahes IR). Diese kurzwellige Strahlung geht fast zu 100 % durch die Wände unseres Kunststoffbechers, ohne absorbiert zu werden. (Ähnlich verhält sich die Erdatmosphäre, durch die ca. 2/3 des eingestrahlten Sonnenlichts durchgehen, ca. 1/3 wird reflektiert.)

Absorption im Becher: Befindet sich im Becher ein Material wie schwarzes Papier, absorbiert dieses fast zu 100 % das kurzwellige Licht und erwärmt sich dadurch (dasselbe ist auch bei der Erdoberfläche der Fall).

Langwellige Wiederabstrahlung des Absorberpapiers: Das auf ca. 310 K aufgewärmte Absorptions-Material gibt nun einerseits durch Wärmestöße seiner kleinsten Teilchen Wärme an die Luft im Inneren ab. Andererseits strahlt es nun selbst wieder ab. Aufgrund der niederen Temperatur liegt das Spektrum der Wiederabstrahlung von aufgewärmter Luft und vom Absorberpapier im langwelligen IR-Bereich von mehreren µm Wellenlänge.
(Auch die erwärmte Erdoberfläche gibt ihre Wärme wieder hauptsächlich durch Strahlung ab. Ein guter Teil wird aber auch durch sog. Konvektion abtransportiert, d. h. durch die warme Erdoberfläche erwärmte Luft und Wasserdampf steigen nach oben und transportieren Wärme ab. Diesen Effekt haben wir auch bei unserem Becher, unterbinden ihn aber durch den Deckel.

Reflexion, Absorption und Wiederabstrahlung der Becherwand: Die langwellige Strahlung wird nun von der Becherwand teils reflektiert, teils absorbiert. Die durch Absorption aufgewärmte

© Siemens Stiftung 2017. Inhalt lizenziert unter CC BY-SA 4.0 international

Wand strahlt einen Teil der Energie in das Gefäßinnere zurück und einen Teil in die Umgebung ab. Auf diese Weise – direkte Reflexion an der Becherwand und Rückstrahlung der aufgewärmten Becherwand – wird die Energieabstrahlung abgebremst und das Behälterinnere bleibt wärmer als die Umgebung. Unser Gefäßinneres kann also nicht direkt an die Außenwelt Strahlungsenergie abgeben, da diese die Becherwand nur zu geringem Teil durchdringen kann.
(Der gleiche Effekt tritt an der Erdoberfläche auf: Ein Teil der abgestrahlten Energie wird in den Wolken und Gasteilchen der Luft absorbiert. Diese strahlen nur einen Teil in den Weltraum ab und den Rest wieder zurück zur Erde. Diese Rückstrahlung trägt ganz wesentlich zur Temperaturerhöhung der Erde bei. Sie wird noch verstärkt, wenn anteilig mehr im langwelligen Bereich absorbierende Gase wie CO_2 in der Atmosphäre vorhanden sind.)
Wir müssen allerdings anmerken, dass in unserer Versuchsanordnung ein wesentlicher Verlust an Wärme nicht durch Strahlung, sondern durch Konvektion im Inneren des Bechers hin zu den Wänden und durch direkte Wärmeleitung durch die Wände erfolgt!

Weitere Anwendungen des Treibhauseffekts in Technik und Alltag: Praktische Anwendungen des Treibhauseffekts sind z. B. Gewächshäuser und Energiesparhäuser. Ein anderes Phänomen ist z. B., dass sich bei Sonnenschein ein Auto trotz Minusgraden im Winter im Inneren sehr stark aufheizen kann oder dass es in klaren Winternächten kälter ist als in wolkenbedeckten.

© Siemens Stiftung 2017. Inhalt lizenziert unter CC BY-SA 4.0 international